

〔西德〕H·W·伏欣 著
沈克扬 译 管德 校

气 动 弹 性 力 学 原 理

489958



上海科学技术文献出版社

489958

V215.3
C2

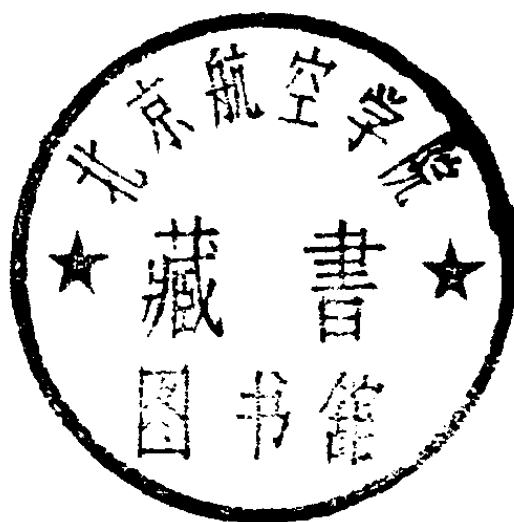
41K61/15

气劼弹性力学原理

〔西德〕H·W·伏欣 著

沈克扬 译

管德 校



C0180228

上海科学技术文献出版社

内 容 提 要

本书作者系世界著名空气动力学和振动力学专家，现任西德航宇研究院气动弹性力学研究所所长。本书系统全面地总结了各类飞行器（包括飞机、直升机、导弹和火箭等）和高空高层结构（例如高层建筑、桥梁、高空电缆、龙门吊车、船舶桅杆、电视尖塔和烟囱等）在空气流动中所受空气动力、结构变形和振动的理论，附有大量实验结果和计算例题。

读者对象：工业、交通运输各部门的结构设计人员，航空院校和理工科大学力学专业及有关专业的大学生。

Grundlagen der Aeroelastik

H. W. Försching

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York 1974

气动弹性力学原理

〔西德〕H·W·伏欣 著

沈克扬 译

管德校

HK61/15

译 者 的 话

当弹性物体在空气中运动或受空气流动的作用时，弹性体上会受到空气动力的作用。于是，弹性体会发生变形或振动，同时气动力本身也发生变化。如果气动力使弹性体的变形或振动加剧，就会使结构破坏。气动弹性力学正是研究这一过程的一门学科，它的主要内容是弹性体空气动力学和振动力学。同时，随着结构设计的优化考虑以及主动地对气动弹性过程进行人为的控制，气动弹性力学与自动控制理论的关系也日益密切。

就研究对象的不同而论，气动弹性力学大致可分成两大分支。一个分支是飞行器气动弹性力学，另一个分支是建筑结构气动弹性力学。前者研究飞机、直升机、导弹、火箭直至航天飞机和卫星等飞行器的气动弹性问题，关于这方面的知识已成为设计和制造先进的飞行器所必备的基础。后者是近年来蓬勃发展的一个分支，它研究大型的高层建筑、桥梁、高空电缆、龙门吊车以及细长的船舶桅杆、电视尖塔、烟囱等各种具有弹性的建筑物的气动弹性问题。由于这些建筑结构几乎与国民经济的所有部门都有关系，因此保证它们的安全和工作可靠具有极其重要的意义。

本书是近年来一本优秀的气动弹性力学专著。作者 H. W. 伏欣教授是当代世界著名的气动弹性力学专家，现任德意志联邦共和国航宇研究院(DFVLR)气动弹性力学研究所所长。他对飞行器和建筑结构两大分支的气动弹性问题都具有广泛而深入的研究。本书基本上总结了七十年代以前世界各国在气动弹

性领域内的主要研究成果，特别是首次对建筑物的气动弹性问题作了较多的阐述。

在本书的翻译过程中，译者得到了各方面的关怀和支持。本书全部译稿由我国气动弹性力学专家管德同志作了详细校阅。此外，许多同志校对了部分译稿，其中特别应指出的有舒文虎、陈元春、叶敬棠、吴家龙、王文亮、吴兴世、王星灿、徐炳谦等同志。译者谨对他们表示深切的谢意。

最后，为了补充关于弹性体在大气紊流中的动力响应方面的知识，我们翻译了一篇关于“紊流中飞机的飞行问题”的综合评论，作为本书的附录。该文作者 G. Coupry 现任法国航宇研究院(ONERA)结构部主任，是世界著名的大气紊流专家。译文由赵令诚老师校对，译者特此致谢。

由于译者水平所限，译文中难免有错误和不当之处，恳切希望读者批评指正。

译者 1980.11.

前 言

空气流动作用于弹性物体而产生的气动弹性过程几乎是一种日常发生的现象。树木和庄稼受风吹而摇摆,旗帜和船帆在风中颤动。另外,风还会“吹奏”古代就著名的风鸣琴,使空中电缆“歌唱”。工程技术的许多部门也会遇到类似这些以及其他许多气动弹性现象,从而引起实践中很重要的严重问题。特别是飞行器可能发生多种多样的气动弹性问题,因此详细了解和解决这些问题是使飞行器结构达到工作安全和最优设计两大目标的基本先决条件。另外,在高空高层工程结构领域中,建筑物的设计构思越来越大胆、建筑物的规模越来越宏大,这种趋势也不断地引起新的气动弹性问题;而且,这时气动弹性观点往往成为设计中的制约因素。

为了理解气动弹性过程而进行有目的的气动弹性研究是在本世纪二十年代才开始的。当时,得到了第一批用来发展理论基础的数学表达式。因此,气动弹性力学是一门比较年轻的学科。特别是在过去十五年内它又获得了突飞猛进的发展,并且继续处于发展过程中。总的说来,现在气动弹性力学已经发展到可以就它的基本原理进行综合的和普遍的阐述这样一种阶段了。同时,自从关于这一学科的上部英语著作问世以来又已经过去了十多年,在这期间由于电子计算机的使用,这门学科又获得了决定性的进展,同时又研究发展了许多新的原理和方法。因此,航空和工程-高层结构等部门的工程师和大学生多次提出的愿望——对气动弹性力学的理论基础作一广博的阐述

看来是很正确的。本书应该满足这种合理要求，同时还可以作为航空专业高年级学生的教科书，从事实际工作的工程师、空气动力学工作者以及振动专业人员的参考书。

由于气动弹性力学介于空气动力学学科与弹性力学和机械振动学科之间，本书可以分为大约相等的两大部分。第一大部分，从第一章到第三章，主要讨论弹性力学和空气动力学的基本原理，这是分析处理气动弹性力学问题的基本工具。由于弹性力学和空气动力学方面已经存在许多著名的教科书，自然会产生一个疑问，就是本书是否还有必要再重新叙述这方面的内容。原因很简单：气动弹性力学工作者所需要的空气动力学和弹性力学的关系式具有非常特殊的形式，因此有关的空气动力学和弹性力学书籍中所表达的形式大多并不适用。此外，弹性物体作谐和振动时的非定常空气动力学问题在标准的空气动力学著作中一般不予讨论或至多略提一笔，所以空气动力学的这个重要分支（它的发展主要是由于气动弹性力学所提出的问题）已成为气动弹性力学的固定内容。因此可以理解，在第二章和第三章中叙述气动弹性力学的弹性力学和空气动力学基础时，由于要讨论的材料如此丰富，以致常常只能略去各个关系式的详细推导，而仅指出有关的参考文献。但是，只要读者具备高等院校中讲授的空气动力学、弹性力学或强度理论的基本知识，阅读本书是不会发生困难的。

本书的第二大部分是讨论气动弹性本身的问题。首先，在第四章中讨论气动弹性方程的一般分析方法和求解步骤。由于从数学观点来看这些方程具有许多共同的特点，因此可用比较一般的形式来进行处理。然后，第五章讨论气动弹性静力学问题，这些问题主要是在飞行器上发生的。第六章则研究工程上十分重要的气动弹性动稳定性问题，其中特别是颤振问题。最

后,在第七章中还要讨论弹性物体对于随时间任意变化的外界气动激励力作用下所引起的结构气动弹性动力响应问题。其中特别注意讨论气动弹性突风问题。

本书还首次对工程-高层结构的气动弹性问题作了详细阐述。为了能深入理解本书阐明的各种关系式以及了解它们在实际问题中的应用,本书从工程实践中收集了总共 23 个计算实例。另外,为了获得实际见解和检验理论关系,本书从文献中搜集了大量实验结果。作者还力图由浅入深、循序渐进地阐明比较复杂的解析关系式。作者也完全了解,工科大学生和从事实际工作的工程师一般并不具备为了理解非定常空气动力学关系式所必需的数学知识。因此,对本书的材料进行深入研究时必须参考有关的数学标准文献才能加深理解。

此外,每章都附有参考文献,总计约 500 篇。但是,决不能认为这些文献是完整的,因为最近十年来像一股真正的洪流一样出版着大量的气动弹性力学文献,几乎每天都有新的出版物。这也最好地证明了气动弹性力学的重要性。只有作者认为最有意义以及读者能够得到的参考文献才收入本书。

(以下致谢部分译略)

H·W·伏欣

1974.7 于哥廷根

目 录

第一章 引言和气动弹性问题的分类	1
1.1 定义和历史梗概	1
1.2 气动弹性过程的基本物理关系	7
1.2.1 气动弹性方块图	7
1.2.2 气动弹性算子	13
1.3 气动弹性问题的分类	14
1.3.1 气动弹性的力三角形	14
1.3.2 气动热弹性的力四面体	19
1.3.3 空间运载系统的气动弹性问题及有关问题	20
参考文献	22
第二章 弹性力学基础	24
2.1 引言	24
2.2 一维梁式系统的弹性力学特性	27
2.2.1 概述	27
2.2.2 简单梁理论的基本方程	28
2.2.3 剪心和弹性轴	36
2.2.4 利用影响函数对弹性特征作一般描述	44
2.2.5 大展弦比后掠机翼的弹性特征	56
2.2.6 动载荷作用下的特性和固有振动特性	63
2.2.7 轴向离心力影响下的一维旋转系统	72
2.3 二维板式系统的弹性力学特性	74
2.3.1 概述	74
2.3.2 板壳线性化理论的基本方程	75
2.3.3 利用二维影响函数描述平面结构的弹性力学特性	97
2.4 三维弹性系统的结构特性	105

2.4.1	概述	105
2.4.2	无约束弹性连续介质的运动方程	106
2.4.3	真空中的自由固有振动	113
2.4.4	广义动力学基本方程	119
2.5	具有结构阻尼的弹性力学系统	128
2.5.1	基本关系式	128
2.5.2	阻尼定律和阻尼参数	129
2.5.3	广义运动方程中考虑结构阻尼	132
参考文献		138

第三章 空气动力学基础142

3.1	引言	142
3.2	流体物理学基本关系	144
3.2.1	概述	144
3.2.2	流动介质的物理性质	145
3.2.3	流体力学基本方程	150
3.2.4	旋涡运动	167
3.2.5	具有摩擦和边界层的流动	176
3.2.6	空气动力算子	179
3.3	定常流动中的升力系统	182
3.3.1	概述	182
3.3.2	二维定常流中的机翼	183
3.3.3	三维定常流中的有限翼展机翼	197
3.3.4	定常跨音速流中的机翼	220
3.3.5	定常流中的机翼-舵面系统	222
3.3.6	空气动力片条理论	232
3.4	谐和振动升力系统的非定常空气动力学	236
3.4.1	概述	236
3.4.2	二维流中的谐和振动机翼	237
3.4.3	三维流中的谐和振动升力面	272
3.4.4	三维超音速流中的谐和振动升力面	294
3.4.5	跨音速流中的谐和振动升力面	305

3.4.6	谐和振动升力系统的非定常气动力干扰	309
3.5	轴向流中的谐和振动细长体	320
3.5.1	概述	320
3.5.2	非定常细长体理论	320
3.5.3	机翼-机身和机翼-外挂物的非定常气动力干扰	323
3.6	任意运动升力系统的非定常空气动力学	325
3.6.1	概述	325
3.6.2	平面流中的任意运动升力系统	326
3.6.3	任意运动时的有限翼展升力系统	341
3.7	工程结构剖面的非定常空气动力学	343
3.7.1	概述	343
3.7.2	周期性旋涡分离的非定常气动力	344
3.7.3	准定常舞动稳定性系数	351
3.8	展望	355
	参考文献	358
第四章	气动弹性方程的一般解法	367
4.1	概述	367
4.2	气动弹性问题的一般表述	367
4.3	解析解法	370
4.3.1	概述	370
4.3.2	直接配置法和矩阵法	371
4.3.3	利用广义坐标和形态函数的配置法	377
4.3.4	Galerkin 法	381
4.3.5	能量法——Rayleigh-Ritz 法	384
4.4	特征方程的数值解法	392
	参考文献	396
第五章	气动弹性静力学问题	397
5.1	引言	397
5.2	平面流中机翼-舵面系统的气动弹性静稳定性	398
5.3	大展弦比升力系统的气动弹性静力学问题	403
5.3.1	概述	403

5.3.2	一般解析关系式	405
5.3.3	气动弹性静力学发散特性	412
5.3.4	弹性机翼的对称升力分布	425
5.3.5	弹性机翼的副翼效率和反对称升力分布	439
5.4	小展弦比升力系统的气动弹性静力学问题	451
5.4.1	概述	451
5.4.2	超音速飞行速度下的弯曲发散	452
5.4.3	小展弦比升力系统气动弹性静力学特性的一般分析	454
5.5	弹性飞机的平尾效率和飞行静稳定性	458
5.5.1	平尾效率	458
5.5.2	弹性飞机的纵向静稳定性	562
5.6	细长飞行器的弯曲发散	466
	参考文献	469

第六章 气动弹性动稳定性问题471

6.1	引言	471
6.2	颤振现象的物理基础	473
6.3	二维颤振理论	481
6.3.1	概述	481
6.3.2	平面颤振问题的经典稳定性方程	482
6.3.3	颤振方程的解	484
6.3.4	参数对颤振稳定性的影响	491
6.4	一维弹性升力系统的颤振理论	497
6.4.1	基于简单梁理论的颤振分析	498
6.4.2	利用广义坐标求解	499
6.4.3	考虑舵面自由度	510
6.4.4	机翼后掠角对颤振特性的影响	521
6.5	二维弹性系统的颤振	527
6.5.1	小展弦比机翼的颤振	528
6.5.2	壁板颤振	531
6.6	整架飞机的颤振理论	547

6.6.1	经典的广义颤振方程	548
6.6.2	伺服操纵飞机的颤振理论	557
6.7	弹性升力系统的其他颤振问题	568
6.7.1	概述	568
6.7.2	失速颤振	569
6.7.3	跨音速舵面颤振(嗡鸣)	573
6.7.4	螺旋桨/旋翼-螺旋颤振	578
6.8	工程-高层结构的气动弹性动稳定性问题	591
6.8.1	概述	591
6.8.2	桥梁颤振	593
6.8.3	舞动不稳定性	597
	参考文献	604
第七章	气动弹性动力响应问题	609
7.1	引言	609
7.2	弹性系统受与系统无关的空气动力作用	611
7.2.1	单质量振子对任意时间函数激励力的动力响应	611
7.2.2	一维弹性系统受任意时间函数大气风力的作用	625
7.3	升力系统受系统运动引起的和与系统无关的空气动力作用	643
7.3.1	平面流动中典型机翼剖面的强迫振动	643
7.3.2	一维弹性升力系统	651
7.3.3	整架飞机的气动弹性突风问题	670
7.4	周期性旋涡分离产生的气动弹性激励振动	673
7.4.1	概述	673
7.4.2	旋涡共振激励	674
7.4.3	随机旋涡激励	679
7.5	气动弹性抖振问题	680
	参考文献	683
附录:	紊流中飞机的飞行问题	687

第一章 引言和气动弹性问题的分类

1.1 定义和历史梗概

气动弹性力学这门学科讨论这样一些物理-工程上的过程和现象, 这些过程和现象是由于空气动力及其引起的弹性反作用力之间发生相互影响而产生的。因此, 每一种受到气流作用的弹性结构都会发生气动弹性问题。但是, 飞行器以及处于自由风速流动中的高层钢结构特别会发生这种问题。气动弹性过程不仅可以具有静力学的性质, 而且也可以具有动力学的性质; 因此, 为了完整地描述其物理关系还必须考虑惯性力。

“气动弹性力学”这个概念是在 30 年代首先由航空工程师形成的, 它概括地表达了实践中非常重要的气动弹性问题。目前, 气动弹性力学早已发展成为一门独立的学科了。随着科学技术的普遍发展(特别是航空科学的发展), 这门学科获得了越来越重要的意义, 并且将继续增加其重要性。随着飞行速度的不断提高, 接连不断地设计出新型的飞行器以及工程-高层结构方面不断设计越来越大胆的建筑结构, 这些都会继续提出新的气动弹性问题。这时, 气动弹性观点经常作为设计的制约因素。

图 1.1 直观地表示了航空技术的整个发展趋势。该图说明了大约半个世纪以来从螺旋桨和喷气推进的“古典”亚音速飞机到细长的超音速和高超音速飞机直至 Apollo 宇宙飞船这一伟大的科学技术进步。除了飞行速度的增长以外, 由于空气动力学

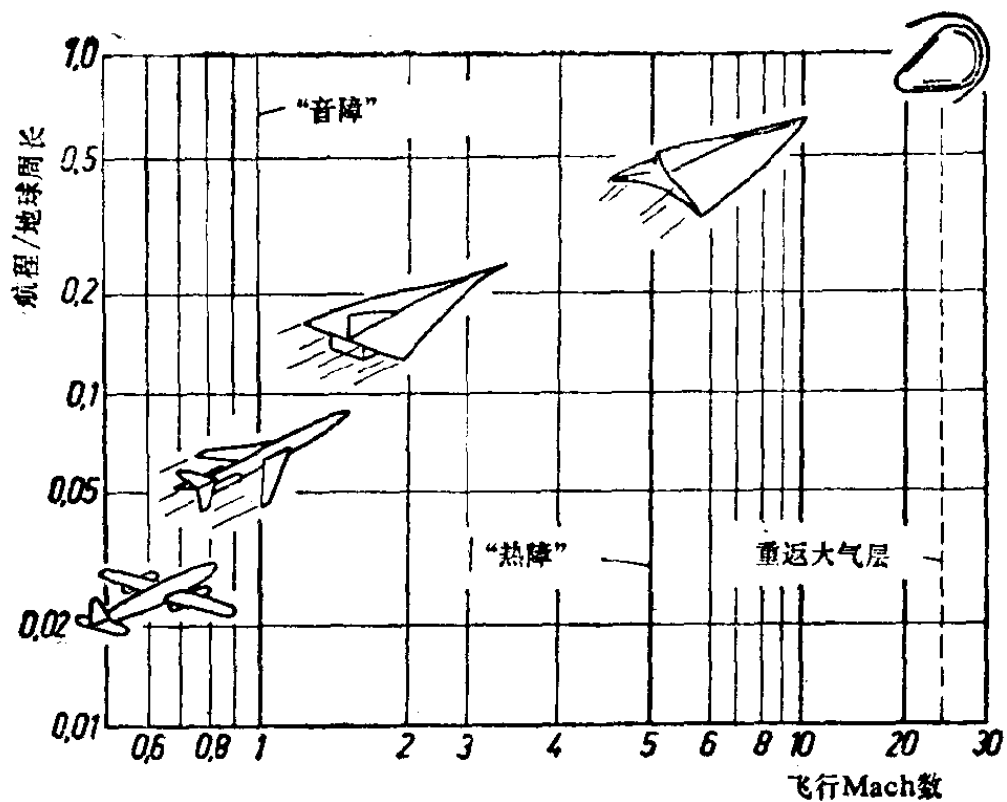


图 1.1 飞机和飞行器的空气动力形态和几何外形随飞行 Mach 数的变化

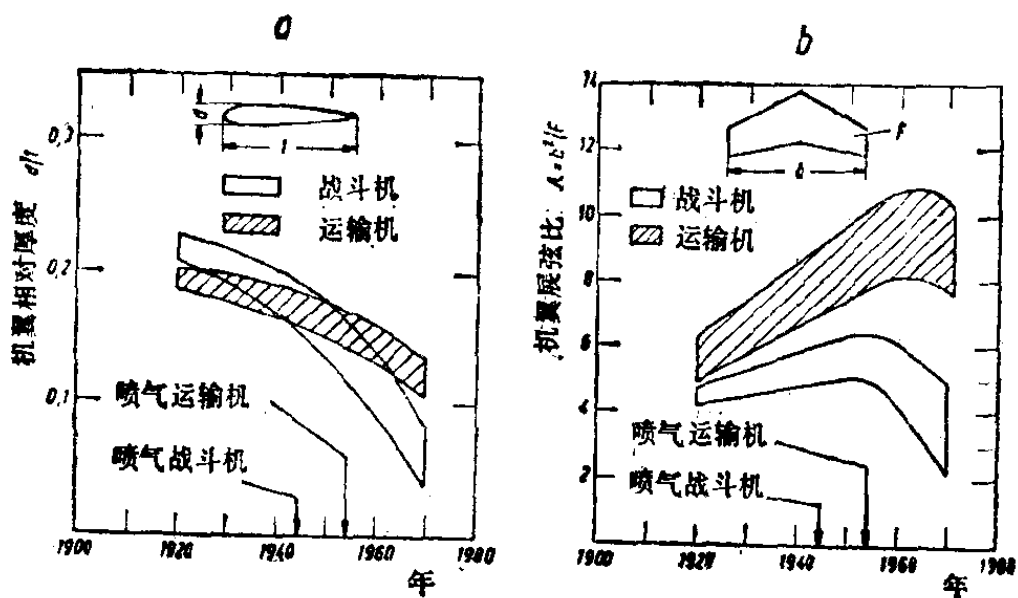


图 1.2 飞机结构的典型发展趋势

a. 机翼相对厚度的变化; b. 机翼展弦比的变化

方面的原因所必需的飞机外形的变化,也导致提出新的气动弹性问题。这种发展到今天还看不出有终止的迹象。图 1.2 还就机翼相对厚度和机翼展弦比的变化表示了飞机结构方面的典型发展趋势。其中特别可注意的是机翼展弦比的发展历史以及与超音速飞行相关的喷气发动机在战斗机方面的强烈影响。

气动弹性问题在航空技术的发展初期就已出现。Wright 兄弟和其他航空先驱者都曾经遇到这类问题,但是他们主要是从直观上解决这些问题的,而不是通过对它们的真实物理关系的认识去解决的。1903 年 Langley 的单翼机首次作有动力的飞行试验时发生了机翼的断裂并骤然坠落在 Potomac 河中。其中,气动弹性效应就起着决定性作用。因为当时 G. Brewer^[1.1]就以某种方式说明了机翼断裂如何是一种典型的气动弹性静力学中的扭转发散问题。由于 Langley 的单翼机的坠落以及其后不久 Wright 兄弟的双翼机获得有动力飞行的首次成功,可能促使人们从此对双翼机给予了较多的信赖;当然,双翼机机翼具有较高的扭转刚度也是一个原因。然而不久,又出现了另一些气动弹性问题。特别是由于机身与尾翼的扭转刚度不够发生了尾翼颤振,同时由于第一次世界大战初期 Handley Page 轰炸机的坠落,才终于导致 F. W. Lanchester^[1.2] 以及 L. Baird 和 A. Page^[1.3] 进行了第一批有目的的气动弹性颤振研究。

后来,随着二十年代单翼机的发展出现了一系列新的气动弹性问题;在这期间也开始对气动弹性现象的科学探讨和研究。静力学的扭转发散问题以及机翼颤振引起了特殊的困难;而对于如何排除舵面颤振, A. Baumhauer 和 C. Koning^[1.4] 在 1922 年就已知道舵面质量平衡是一种有效的措施了。H. Reissner^[1.5] 在 1926 年公开发表了解决扭转发散问题的一种理论,在此期间 W. Birnbaum^[1.6] 和 H. Wagner^[1.7] 也已进行了一些关于振动

机翼非定常空气动力关系的基本研究, 这些研究分析求解机翼颤振问题的基础。在二十年代的末期, H. G. Küssner^[1.8] 以及 W. J. Duncan 和 R. A. Frazer^[1.9, 1.10, 1.11] 发展了机翼颤振理论的主要内容。最后, Th. Theodorsen^[1.12] 在 1934 年成功地获得了具有舵面的谐和振动折线翼型非定常空气动力问题的精确解, 从而建立了解析地求解机翼颤振问题的又一个里程碑。

1939 年爆发第二次世界大战以前的那段时间是以航空工业的猛烈发展作为标志的。随着新型(悬臂单翼式)机翼和机身结构的出现以及功率日益增大的发动机的发展, 人们使飞机的飞行速度达到了接近音速。这就要求在所有从事航空事业的国家内都必须进行强有力的研究工作, 以解决大量出现的气动弹性问题。于是, 气动弹性力学开始发展成为一门独立的科学分支。科学出版物也迅速地增多了。那时, 舵面和尾翼的颤振是气动弹性方面的飞行失事的主要原因, 特别是调整片(辅助舵面)的颤振是经常发生的。到第二次世界大战将近结束的时候, 由于飞行速度提高到跨音速范围以及出现了第一批超音速飞机, 又提出了新的气动弹性问题。气动弹性的静不稳定性(特别是大型飞机的舵面效率)问题和抖振问题获得了越来越重要的意义。随着伺服操纵机构和自动飞行控制系统的出现, 飞行力学和气动弹性力学又越来越紧密地联系在一起了。

但是, 这时又发生了另一件划时代的事件; 这个事件使气动弹性过程的实际重要性在航空技术以外的领域内第一次明显地表现出来。这就是 Tacoma 悬桥在 1940 年由于气动弹性振动激励^[1.13]而倒塌。Tacoma 悬桥的倒塌是在相当低的风速——18 米/秒的情况下发生的, 而且在倒塌前已经观察到桥面相对于水平线有 45° 的扭转角(见图 1.3)。在发生这种情况后, 人们才首次谈论与机翼颤振现象相类似的桥梁颤振。从此以后,